

Asymetria napięciowego efektu stężeniowych warstw granicznych w 2-membranowej komórce dyfuzyjnej

Hanna Werner, Andrzej Ślęzak

Katedra Biomedycznych Podstaw Kultury Fizycznej, Politechnika Częstochowska

Streszczenie

Celem pracy było zbadanie asymetrii napięciowego efektu stężeniowych warstw granicznych w 2-membranowej komórce dyfuzyjnej, w której membrany były ustawione w płaszczyznach horyzontalnych. Materiałem badawczym były płaska, symetryczna i porowata membrana z octanu celulozy stosowana w hemodializatorze zwojowym oraz wodne roztwory chlorku sodu.

Badania elektrycznych napięć membranowych ψ_o i ψ_s przeprowadzono w dwóch izotermicznych etapach. W pierwszym etapie wyznaczono charakterystykę $\psi_o(t)$ w warunkach, w których membrany M_l i M_r ustawione były w płaszczyznach wertykalnych. W drugim etapie wyznaczano charakterystykę $\psi_s(t)$ w sytuacji, w której membrany M_l i M_r ustawione były w płaszczyznach horyzontalnych. We wszystkich etapach monitoring elektrycznych napięć membranowych prowadzono aż do uzyskania stanu stacjonarnego.

Otrzymane rezultaty pokazały, że $\Psi_s = \psi_s - \psi_o$ jest nieliniową funkcją stężeń (C_{ms}/C_o) roztworów, znajdujących się w przedziałach środkowym (C_{ms}) i zewnętrznych (C_o) 2-membranowej komórki dyfuzyjnej. Stwierdzono, że owa komórka posiada właściwość asymetrii napięciowego efektu stężeniowych warstw granicznych. Miarą owych właściwości jest odpowiedni współczynnik asymetrii. Wartość tego efektu zależy od stężenia roztworów oraz konfiguracji 2-membranowej komórki dyfuzyjnej.

Słowa kluczowe: transport membranowy, membrana polimerowa, potencjał membranowy, współczynnik wzmocnienia, dyfuzja

Asymmetry of voltage concentration boundary layers effect in double-membrane diffusive cell

Summary

The aim of this work was to investigate the asymmetry of voltage concentration boundary layers effect in double-membrane diffusive cell, in which the membranes were fixed in horizontal planes. The research material consisted of flat, symmetrical and porous membrane of regenerated cellulose applied in the coil hemodialyzer and aqueous sodium chloride solutions.

The studying of membrane electric voltages ψ_o and ψ_s were carried out in the series of two isothermal stages. In the first stage was established the $\psi_o(t)$ characteristic in the conditions in which membranes M_l i M_r were fixed vertically. In the second stage the $\psi_s(t)$ characteristic was established in the situation in which M_l and M_r membranes were fixed horizontally. In all stages the monitoring of membrane electrical voltages was carried out until the stationary state was achieved.

The obtained results shows, that $\Psi_s = \psi_s - \psi_o$ is the non-linear function of concentrations (C_{ms}/C_o) of the solutions being in the ranges both central (C_{ms}) and external (C_o) in a double-membrane diffusive cell. It has been stated that this cell has the properties of asymmetry the voltage effect of the concentration boundary layers. The measure of these properties is an adequate asymmetry coefficient. The value of this effect depends on the concentration of the solutions and the configuration of double-membrane diffusive cell.

Key words: membrane transport, polymeric membrane, membrane potential, amplification coefficient, diffusion

WPROWADZENIE

Termodynamika nierównowagowa jest stosunkowo młodą dyscypliną naukową. Jej historia rozpoczyna się wraz z opublikowaniem w 1931 roku dwóch prac Larsa Onsagera, zawierających między innymi równanie fenomenologiczne i relacje symetrii [1, 2]. Jednym z ważniejszych osiągnięć aplikacyjnych termodynamiki nierównowagowej XX wieku, było jej użycie do opisu transportu membranowego. Przykładem jest opracowany przez Currana i McIntosha w latach 60. ubiegłego wieku model błony podwójnej, który objaśnia biofizyczne aspekty transportu wody, zarówno w układach biologicznych jak i sztucznych [3].

Model ten wymaga istnienia dwu barier o różnych parametrach przenikania, ułożonych w serię i rozdzielających roztwory o różnych stężeniach. Wykazano, że w tym układzie możliwy jest transport zgodny z gradientem stężenia, transport izoosmotyczny, a także bierny transport wbrew gradientowi stężenia. Ponadto ów układ 2-membranowy posiada, charakterystyczne dla układów biologicznych, właściwości prostownicze (asymetria strumieni: objętościowego, substancji rozpuszczonej i wody, ciśnienia hydromechanicznego oraz asymetrię charakterystyk prądowo-napięciowych) [4-6]. Opublikowane w ostatnim dziesięcioleciu prace świadczą o tym, że możliwości aplikacyjne modelu błony podwójnej Currana-McIntosha nie zostały wyczerpane [7, 8]. W dalszym ciągu ów model stanowi solidną podstawę interpretacyjną biologicznych zjawisk transportowych.

Z dotychczasowych badań [3, 9-12] wynika, że układ 2-membranowy można otrzymać w wyniku szeregowego lub równoległego połączenia dwóch układów 1-membranowych, w których membrany są ustawione w płaszczyznach horyzontalnych lub wertykalnych. W przypadku szeregowego połączenia, roztwory rozdzielane przez membrany spełniają warunek $C_l > C_m > C_r$, a w przypadku połączenia równoległego - warunek $C_l < C_m > C_r$. Jeśli roztwory rozdzielane przez membrany są pozbawione zewnętrznego mieszania mechanicznego, to każda z membran tworzących 2-membranową komórkę osmotyczno-dyfuzyjną ulega polaryzacji stężeniowej. Owa polaryzacja polega na kreacji po obydwu stronach każdej z membran, stężeniowych warstw granicznych.

Wykazano, że siła grawitacji jest jednym z czynników znacząco wpływających na procesy biernego osmotycznego i dyfuzyjnego transportu membranowego, w układach zarówno 1- jak i 2-membranowych. Wpływ ten zachodzi poprzez oddziaływanie na stan uformowanych po obydwu stronach membrany lub membran w warunkach mikrogravitacji, stężeniowych warstw granicznych. Wpływ pola grawitacyjnego na procesy biernego transportu w 2-membranowej

komórce osmotyczno-dyfuzyjnej, przejawia się w postaci efektów grawiosmotycznych, grawidyfuzyjnych i grawielektrycznych [9, 13-19].

Celem poprzednich prac [20, 21], było określenie wpływu stężeniowych warstw granicznych na właściwości elektryczne 2-membranowej komórki dyfuzyjnej, składającej się z dwóch układów 1-membranowych połączonych równolegle, w których membrany były ustawione w płaszczyznach horyzontalnych. Zbadano efekt napięciowy stężeniowych warstw granicznych w 2-membranowej komórce dyfuzyjnej, zawierającej 2- i 3-składnikowe roztwory elektrolityczne. Materiałem badawczym były płaska, symetryczna i porowata membrana z octanu celulozy, stosowana w hemodializatorze zwojowym oraz wodne roztwory chlorku sodu, wodne roztwory etanolu, roztwory chloru sodu w wodnym roztworze etanolu oraz roztwory etanolu w wodnym roztworze chlorku sodu.

Badania elektrycznych napięć membranowych ψ_o i ψ_s odbywały się w trzech etapach. W pierwszym etapie wyznaczono charakterystykę $\psi_o(t)$ w warunkach, w których jednakowe membrany M_l i M_r ustawione były w płaszczyznach wertykalnych. W drugim etapie wyznaczano charakterystykę $\psi_s(t)$ w sytuacji, w której membrany M_l i M_r ustawione były w płaszczyznach horyzontalnych. Trzeci etap był identyczny jak pierwszy. We wszystkich etapach pomiar elektrycznych napięć membranowych, prowadzono aż do uzyskania stanu stacjonarnego.

W sytuacji gdy membrany M_l i M_r ustawione były w płaszczyznach wertykalnych, całkowite elektryczne napięcie membranowe ψ_o zmierzone przy pomocy elektrod E_1 i E_2 było wypadkową: napięcia elektrodowego ψ_1 (na elektrodzie E_1), spadku potencjału ψ_1^o w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną l_l^o , napięcia membranowego (ψ_{Mo}^l), spadku potencjału ψ_{lm}^o w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną l_{lm}^o , spadku potencjału ψ_{rm}^o w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną l_{rm}^o , napięcia membranowego (ψ_{Mo}^r), spadku potencjału ψ_r^o w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną l_r^o oraz napięcia elektrodowego ψ_2 (na elektrodzie E_2):

$$\psi_o = \psi_1 + \psi_l^o + \psi_{Mo}^l + \psi_{lm}^o + \psi_{rm}^o + \psi_{Mo}^r + \psi_r^o + \psi_2 \quad (1)$$

W sytuacji gdy membrany M_l i M_r ustawione były w płaszczyznach horyzontalnych, całkowite elektryczne napięcie membranowe ψ_s zmierzone na elektrodach E_1 i E_2 było wypadkową: napięcia elektrodowego ψ_1 (na elektrodzie E_1), spadku potencjału ψ_l w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną l_l , napięcia membranowego (ψ_M^l), spadku potencjału ψ_{lm} w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną l_{lm} ,

spadku potencjału ψ_{rm} w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną l_{rm} , napięcia membranowego (ψ_M^r), spadku potencjału ψ_r w obszarze roztworu stanowiącego stężeniową warstwę graniczną l_r oraz napięcia elektrodowego ψ_2 (na elektrodzie E_2):

$$\psi_s = \psi_1 + \psi_l + \psi_M^l + \psi_{lm} + \psi_{rm} + \psi_M^r + \psi_r + \psi_2 \quad (2)$$

Różnicę elektrycznych napięć membranowych ψ_s i ψ_o nazwano *efektem napięciowym stężeniowych warstw granicznych* i oznaczono symbolem Ψ_s

$$\Psi_s = \psi_s - \psi_o \quad (3)$$

Biorąc pod uwagę wartości $\psi_s(t)$ oraz $\psi_o(t)$ w stanie stacjonarnym, obliczono efekt napięciowy stężeniowych warstw granicznych (Ψ_s), dla różnych stężeń roztworów tych samych substancji w przedziale międzymembranowym 2-membranowej komórki dyfuzyjnej i sporządzono zależności $\Psi_s(C_s)$.

Celem obecnej pracy jest zbadanie efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych w dwumembranowej komórce dyfuzyjnej, zawierającej dwie różne membrany M_l i M_r i wodne roztwory NaCl oraz zbadanie zjawiska asymetrii efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych.

MATERIAŁ I METODY

Materiałem badawczym były płaskie i symetryczne membrany z octanu celulozy o nazwie *Nephrophane* i *Ultra Flo 145 Dialyzer*, stosowane w hemodializatorze zwojowym oraz wodne roztwory chlorku sodu o stężeniach od $10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ do $10^{-2} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$. W stanie uwodnionym grubość membrany *Nephrophane* wynosiła około 200 μm , a membrany *Ultra Flo 145 Dialyser* – około 800 μm .

Badania wpływu stężeniowych warstw granicznych na właściwości elektryczne 2-membranowej komórki dyfuzyjnej, przeprowadzono za pomocą typowego zestawu pomiarowego opisanego w pracach [20, 22]. Ów zestaw składał się z 2-membranowej komórki dyfuzyjnej, dwóch zewnętrznych odwracalnych elektrod chloro-srebrowych (E_1 i E_2), elektrometru i rejestratora. 2-membranowa komórka elektrochemiczna składała się z trzech cylindrycznych naczyń l , m oraz r rozdzielonych membranami M_l i M_r , o powierzchni 3,36 cm^2 każda. Pojemność naczyń l , m oraz r była jednakowa i wynosiła 300 cm^3 .

Naczynia zewnętrzne (l oraz r) we wszystkich eksperymentach zawierały wodne roztwory NaCl o stężeniu $C_l=C_r=C_o=10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$. Naczynie m wypełniano badanym roztworem

dwuskładnikowym lub trójskładnikowym. Do naczyń l oraz r rezerwuary (N) zawierające wodny roztwór NaCl o stężeniu $C_0=10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$. Schemat konstrukcyjny elektrod E_1 i E_2 przedstawiono w pracy [22]. Każda z elektrod składała się z trzech części. Pierwsza część (szklana) o długości 4 cm zawierała wtopione włókno lniane, druga część (pleksiglasowa) o długości 4 cm zawierała elektrodę odwracalną Ag/AgCl. Obydwie części połączono szczelnie giętkim węzem igielitowym. Owe trzy elementy elektrod E_1 i E_2 wypełniono $1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ wodnym roztworem KCl nasyconym AgCl. Końcówki elektrod E_1 i E_2 podłączono do naczyń l oraz r w odległości około 1,5 cm, odpowiednio od membrany M_l i M_r . We wszystkich eksperymentach elektrody odwracalne Ag/AgCl były ustawione pionowo. Nie stosowano mieszania mechanicznego roztworów. 2-membranowa komórka dyfuzyjna, elektrody E_1 i E_2 były umieszczone w termostatowanej i uziemionej osłonie elektrostatycznej. Pomiary przeprowadzono w stałej temperaturze $T=(295\pm0,1) \text{ K}$.

Biorąc pod uwagę wartości $\psi_s(t)$ oraz $\psi_o(t)$ w stanie stacjonarnym, obliczono na podstawie równania (3) efekt napięciowy stężeniowych warstw granicznych (Ψ_s), dla różnych stężeń roztworów tych samych substancji w przedziale środkowym (m) 2-membranowej komórki dyfuzyjnej i sporządzono zależności $\Psi_s(C_s)$. Przeprowadzono dwie serie eksperymentów. W pierwszej serii membranę M_l stanowił *Nephrophane* a M_r – *Ultra Flo 145 Dialyzer*.

Wyznaczone doświadczalnie wartości gęstości (ρ), lepkości kinematycznej (ν) owych roztworów, zostały przedstawione w pracy [23]. Z badań tych wynika, że gęstość wodnych roztworów chlorku sodu rośnie liniowo ze wzrostem stężenia chlorku sodu. Miara właściwości transportowych membrany są współczynniki: przepuszczalności hydraulicznej (L_p), odbicia (σ_s) i przepuszczalności dyfuzyjnej (ω_s). Wartości tych współczynników dla membrany *Nephrophane*, są następujące $L_p=(5,0\pm0,2)\times10^{-12} \text{ m}^3 \text{ N}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, $\sigma_1=(6,0\pm0,2)\times10^2$, $\sigma_1^A=(0,14\pm0,01)\times10^2$, $\sigma_1^B=(1,90\pm0,02)\times10^2$, $\omega_{11}=(5,5\pm0,1)\times10^{10} \text{ mol N}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, $\Omega_{11}^A=(0,70\pm0,04)\times10^{10} \text{ mol N}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ oraz $\Omega_{11}^B=(5,40\pm0,01)\times10^{10} \text{ mol N}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$. Z kolei, wartości tych współczynników dla membrany *Ultra Flo 145 Dialyzer*, są następujące: $L_p=(0,85\pm0,1)\times10^{-12} \text{ m}^3 \text{ N}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, $\sigma_1=(16,7\pm0,5)\times10^2$, $\sigma_1^A=(0,71\pm0,05)\times10^2$, $\sigma_1^B=(5,0\pm0,2)\times10^2$, $\omega_{11}=(14,3\pm0,3)\times10^{10} \text{ mol N}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, $\Omega_{11}^A=(0,45\pm0,04)\times10^{10} \text{ mol N}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ oraz $\Omega_{11}^B=(2,85\pm0,02)\times10^{10} \text{ mol N}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$. Dane te wskazują, że badane membrany są selektywne w stosunku do chlorku sodu ($0<\sigma_s<1$, $0<\sigma_s^i<1$, $s=1,2$; $i=A, B$), ale lepiej przepuszczają cząsteczki wody (duża wartość współczynnika L_p) niż cząsteczki substancji rozpuszczonych (duża wartość współczynników ω_{ks} oraz mała wartość współczynników σ_s i

σ_s^i). Ponadto owe membrany ulegają stosunkowo silnej polaryzacji stężeniowej, z powodu tworzenia się po jej obydwu stronach stężeniowych warstw granicznych. Miarą polaryzacji stężeniowej jest współczynnik polaryzacji stężeniowej (ζ_s^i), który ma sens względnego współczynnika przepuszczalności dyfuzyjnej kompleksu warstwa graniczna/membrana/warstwa graniczna i membrany. Został on zdefiniowany następująco [23]

$$\zeta_s^i = \Omega_s^i \omega_s^{-1}, \quad 0 \leq \zeta_s^i \leq 1 \quad (4)$$

gdzie: Ω_s^i i ω_s – współczynniki przepuszczalności dyfuzyjnej odpowiednio kompleksu warstwa graniczna/membrana/warstwa graniczna i membrany. W przypadku gdy $\zeta_s^i=1$, membrana nie ulega polaryzacji stężeniowej. Jeśli z kolei $\zeta_s^i=0$, polaryzacja stężeniowa membrany jest maksymalna. Obliczone na podstawie wzoru (4) wartości współczynników polaryzacji stężeniowej dla membrany *Nephrophane* wynoszą: $\zeta_1^A=0,082$ oraz $\zeta_1^B=0,52$. Z kolei wartości owych współczynników dla membrany *Cellulose IMP-1* wynoszą: $\zeta_1^A=0,049$ oraz $\zeta_1^B=0,38$.

WYNIKI I OMÓWIENIE

Na ryc. 1 wykres 1 przedstawia zależność napięciowego efektu stężeniowych warstw granicznych (Ψ_1^A) od stosunku stężeń (C_{m1}/C_o) w przedziale środkowym (C_{m1}) i przedziałach zewnętrznych ($C_l=C_r=C_o$) dla konfiguracji A, oraz wykres 2 – zależność $\Psi_1^B(C_{m1}/C_o)$ dla konfiguracji B 2-membranowej komórki dyfuzyjnej. W konfiguracji A membrana M_l znajdowała się nad membraną M_r , zaś w konfiguracji B kolejność ustawienia membran była odwrotna. Z przebiegu krzywej 1 wynika, że Ψ_1^A w przedziale $1 \leq C_{m1}/C_o \leq 25$ rośnie parabolicznie i dla $C_{m1}/C_o=25$ osiąga wartość maksymalną, równą $\Psi_1^A=21$ mV. Dla $C_{m1}/C_o > 25$ (Ψ_1^A) maleje liniowo. Z kolei z przebiegu krzywej 2 wynika, że Ψ_1^B w przedziale $1 \leq C_{m1}/C_o \leq 30$ rośnie parabolicznie i dla $C_{m1}/C_o=30$ osiąga wartość maksymalną równą $\Psi_1^B=28$ mV. Dla $C_{m1}/C_o > 25$, Ψ_1^B maleje liniowo. Tangens kąta nachylenia prostoliniowego odcinka wykresu 1 wynosi 0,15, a wykresu 2 – 0,25. Ponadto z wykresów 1 i 2 wynika, że dla tych samych wartości C_{m1}/C_o , wartości Ψ_1^B są większe niż wartości Ψ_1^A . Oznacza to, że omawiana 2-membranowa komórka dyfuzyjna, zawierająca membrany M_l i M_r różniące się parametrami przenikania, posiada właściwość asymetrii efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych. Miarą owych

właściwości jest współczynnik asymetrii efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych, zdefiniowany następująco

$$k = \frac{\Psi_1^B}{\Psi_1^A} \quad (5)$$

Na ryc. 2 przedstawiono zależność współczynnika k od C_{m1}/C_o . Z wykresu tego wynika, że największą wartość $k=3,5$ współczynnika asymetrii uzyskano dla $C_{m1}/C_o=2,5$. Wraz ze wzrostem wartości C_{m1}/C_o , wartość współczynnika k maleje, a dla $C_{m1}/C_o \geq 20$ osiąga wartość stałą równą $k=1,34$ i niezależną od C_{m1}/C_o .

Przedstawione na ryc. 1 wyniki badań wskazują, że asymetria efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych (Ψ_s) ma miejsce w 2-membranowej komórce dyfuzyjnej, w której membrany M_l i M_r różniły się parametrami przenikania. Membranę M_l stanowił *Nephrophane*, a membranę M_r – *Ultra Flo 145 Dialyser*. Wartości współczynników ζ_s^i dla membrany *Ultra Flo 145 Dialyser* różnią się istotnie od wartości owych współczynników dla membrany *Nephrophane*.

Rozpatrzmy konfiguracje A i B owej komórki dyfuzyjnej przedstawione na ryc. 3. W konfiguracji A membrana M_l znajduje się nad membraną M_r . W konfiguracji B jest odwrotna kolejność ustawienia membran. Z ryc. 1 wynika, że wartości efektu Ψ_s^i dla konfiguracji A są mniejsze niż dla konfiguracji B. Oznacza to, że dla konfiguracji A i B 2-membranowej komórki dyfuzyjnej spełniona jest relacja $C_l^B/C_r^B > C_l^A/C_r^A$. Ponadto dla konfiguracji A i B przedstawionych na ryc. 3 można napisać [24]

$$\Psi_1^A = \frac{RT}{zF} (\Delta t - \Delta t_o) \ln \frac{\xi_l^A}{\xi_r^A} \quad (6)$$

$$\Psi_1^B = \frac{RT}{zF} (\Delta t - \Delta t_o) \ln \frac{\xi_l^B}{\xi_r^B} \quad (7)$$

gdzie:

$$\xi_l^A = \left[1 + \frac{1}{2} (1 - \zeta_l^A) \left(\frac{C_{ms}}{C_o} - 1 \right) \right] \left[1 - \frac{1}{2} (1 - \zeta_l^A) \left(1 - \frac{C_o}{C_{ms}} \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

$$\xi_r^A = \left[1 - \frac{1}{2} (1 - \zeta_r^A) \left(1 - \frac{C_o}{C_{ms}} \right) \right] \left[1 + \frac{1}{2} (1 - \zeta_r^A) \left(\frac{C_{ms}}{C_o} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

$$\xi_l^B = \left[1 + \frac{1}{2} (1 - \zeta_l^B) \left(\frac{C_{ms}}{C_o} - 1 \right) \right] \left[1 - \frac{1}{2} (1 - \zeta_l^B) \left(1 - \frac{C_o}{C_{ms}} \right) \right]^{-1} \quad (10)$$

$$\zeta_r^B = \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \zeta_r^B \right) \left(1 - \frac{C_o}{C_{ms}} \right) \right] \left[1 + \frac{1}{2} \left(1 - \zeta_r^B \right) \left(\frac{C_{ms}}{C_o} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (11)$$

Uwzględniając równania (6) – (11) w równaniu (5) otrzymujemy

$$k = \ln \zeta_l^B (\zeta_r^B)^{-1} \left[\ln \zeta_l^A (\zeta_r^A)^{-1} \right]^{-1} \quad (12)$$

Ze wzoru tego wynika, że aby $k \geq 1$ musi być spełniona relacja $\ln[\zeta_l^B (\zeta_r^B)^{-1}] \geq \ln[\zeta_l^A (\zeta_r^A)^{-1}]$ a co za tym idzie $\zeta_l^B (\zeta_r^B)^{-1} \geq \zeta_l^A (\zeta_r^A)^{-1}$.

LITERATURA

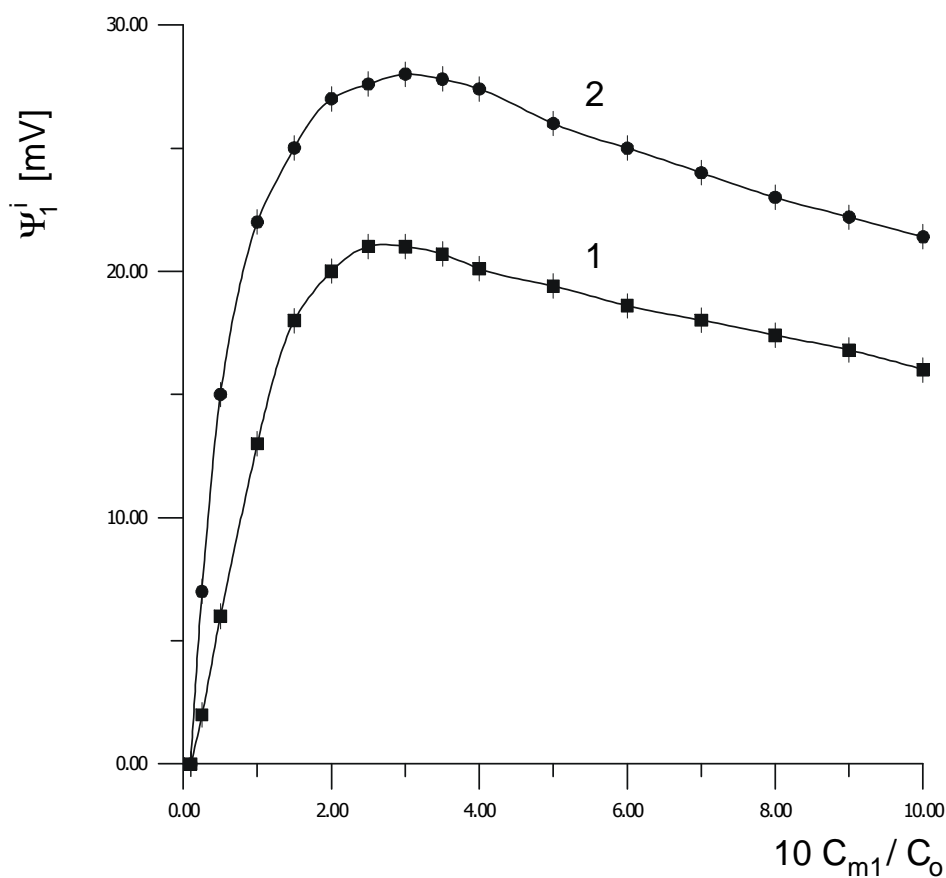
- [1] ONSAGER L.: Reciprocal relations in reversible processes. Part I, Phys. Rev. (1931), 37, 405-426.
- [2] ONSAGER L.: Reciprocal relations in reversible processes. Part II, Phys. Rev. (1931), 38, 2265-2279.
- [3] CURRAN P. F.: MCINTOSH J. R.: A model system for biological water transport. Nature (1962), 193, 347-348.
- [4] DIAMOND J. M., BOSSERT W. H.: Standing-gradient osmotic flow: a mechanism for solute-linked water transport in epithelia. J. Gen. Physiol. (1967), 50, 2061-2079
- [5] PATLAK C. S., GOLDSTEIN D. A., HOFFMAN J. F.: The flow of solute and solvent across a two-membrane system. J. Theoret. Biol. (1963), 5, 426-442.
- [6] RICHARDSON I. W.: Multiple membrane systems as biological models. Current-voltage behaviour. (1972), 8, 219-236.
- [7] SPRING K. R.: Epithelial fluid transport – a century of investigation. New Physiol. Sci. (1999), 14, 92-100.
- [8] GUO P., HILLYARD S. D., FA B. M.: A two barrier compartment model for volume flow across amphibian skin. Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol. (2003), 285, 1384-1394.
- [9] KARGOL M., DWORECKI K., PRZESTALSKI S.: Gravitational flow amplification effects in a series membrane system. Stud. Biophys. (1979), 76, 137-144.
- [10] KEDEM O., KATCHALSKY A.: Permeability of composite membranes. Part 2. Parallel elements. Trans. Faraday Soc. (1963), 59, 1931-1940.
- [11] KEDEM O., KATCHALSKY A.: Permeability of composite membranes. Part 3. Series

- array of elements. Trans. Faraday Soc. (1963), 59, 1941-1953.
- [12] SKRZEKOWSKA-BARAN I.: Wpływ siły grawitacji na bierny transport membranowy roztworów elektrolitowych w układzie dwóch błon modelowych. Praca doktorska. ŚAM Zabrze, 2001.
- [13] ŚLĘZAK A., WĄSIK J., DWORECKI K.: Gravitational effects in a passive transmembrane transport: the flux graviosmotic and gravidiffusive effects in non-electrolytes. J. Biol. Phys. (2000), 26, 149-170.
- [14] ŚLĘZAK A., WĄSIK J., JASIK-ŚLĘZAK J., SKRZEKOWSKA-BARAN I.: Strumieniowy efekt grawiosmotyczny dla serii dwóch płaskich membran polimerowych ustawionych horyzontalnie i trójskładnikowych roztworów nieelektrolitów. Polimery w Medycynie (2001), 31, 42-51.
- [15] ŚLĘZAK A., Wąsik, J., JASIK-ŚLĘZAK J., TWARDOKĘS W.: Ciśnieniowy efekt grawiosmotyczny dla serii dwóch płaskich membran polimerowych ustawionych horyzontalnie. Polimery w Medycynie (2001), 31, 25-32.
- [16] ŚLĘZAK A., WĄSIK J., JASIK-ŚLĘZAK J., TWARDOKĘS W.: Strumieniowy efekt grawiosmotyczny dla serii dwóch płaskich membran polimerowych ustawionych horyzontalnie. Polimery w Medycynie (2001), 31, 33-41.
- [17] ŚLĘZAK A.: Model equations of the volume transport of multicomponent and heterogeneous non-ionic solutions in double-membrane systems. J. Biol. Phys. (1998), 24, 59-78.
- [18] ŚLĘZAK A.: Study of the solute flows of multicomponent and heterogeneous non-ionic solutions in double-membrane system. J. Biol. Phys. (2000), 26, 235-254.
- [19] ŚLĘZAK A., WĄSIK J.: The volume flows of non-electrolyte solutions across a vertically mounted membranes in a double-membrane system. Polish J. Med. Phys. & Eng. (2000), 6, 225-241.
- [20] WERNER H., ŚLĘZAK A.: Rola stężeniowych warstw granicznych w kreacji właściwości elektrycznych komórki zawierającej dwie membrany polimerowe i binarne roztwory elektrolityczne. Polimery w Medycynie (2007), 37, 4, 3-19.
- [21] WERNER H., ŚLĘZAK A.: Rola stężeniowych warstw granicznych w kreacji elektrycznych właściwości wzmacniających komórki zawierającej dwie membrany polimerowe i ternarne roztwory elektrolityczne. Polimery w Medycynie (2008), 38, 1, 47-57.
- [22] WERNER H.: Wpływ stężeniowych warstw granicznych na właściwości elektryczne dwumembranowej komórki dyfuzyjnej. Praca doktorska, ŚAM Zabrze, 2002.

- [23] ŚLĘZAK A.: A model equation for the gravielectric effect in electrochemical cell. Biophys. Chem. (1990), 38, 189-199.
- [24] ŚLĘZAK A., ŚLĘZAK I.H., ŚLĘZAK K.: Influence of the concentration boundary layers on membrane potential In a single-membrane system. Desalination (2005), 184, 113-123.

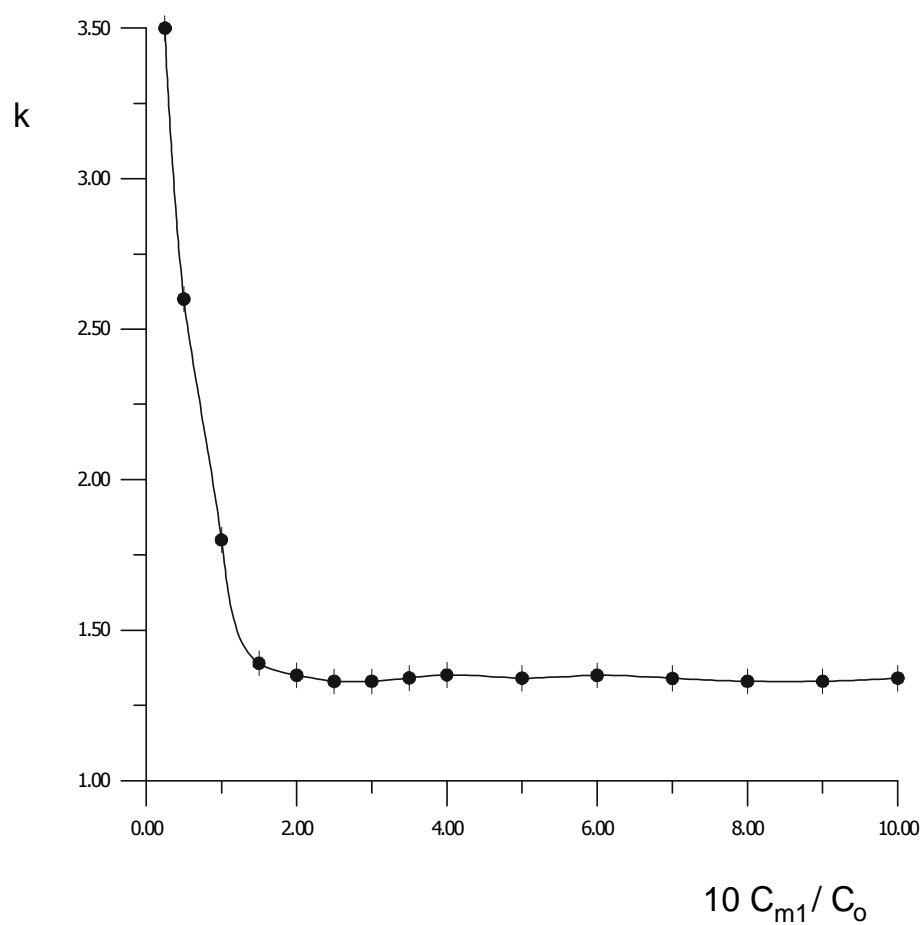
Adres autorów

Katedra Biomedycznych Podstaw Kultury Fizycznej
Wydział Zarządzania Politechniki Częstochowskiej
42-200 Częstochowa, Al. Armii Krajowej 36b
tel. (034) 325 0395, tel./fax (034)361 3876
e-mail: ajslezak@zim.pcz.pl



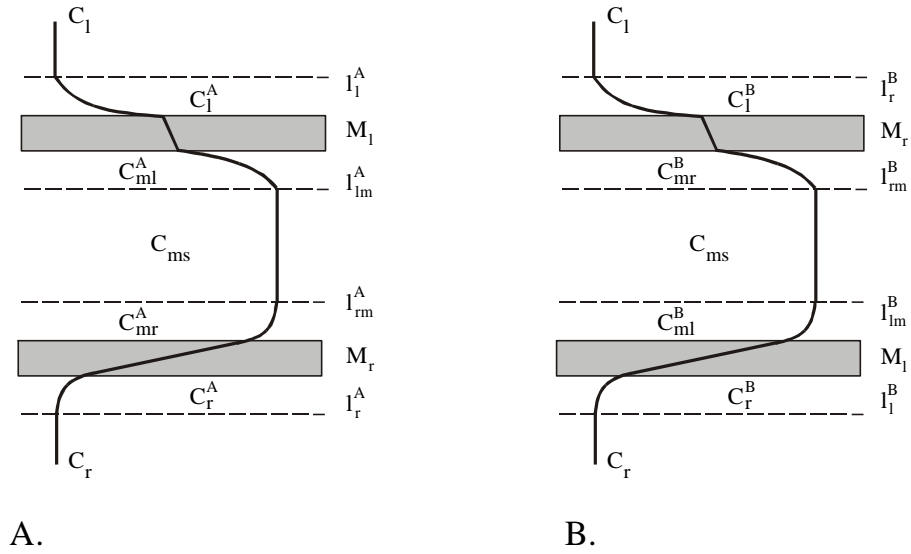
Ryc. 1. Zależności napięciowego efektu stężeniowych warstw granicznych (Ψ_1^i) od stosunku C_{m1}/C_o dla wodnych roztworów NaCl i 2-membranowej komórki dyfuzyjnej, w której membrany M_l i M_r różniły się parametrami przenikania. Wykres 1 otrzymano dla konfiguracji, w której membrana M_l była usytuowana nad membraną M_r , a wykres 2 – dla konfiguracji, w której membrana M_l była usytuowana pod membraną M_r

Fig. 1. Dependencies of the voltage concentration boundary layers effect (Ψ_1^i) on quotient C_{m1}/C_o for aqueous NaCl solutions and double-membrane diffusion cell, in which membranes M_l and M_r differed parameters of permeation. The curve 1 received for configuration, in which membrane M_l was placed over membrane M_r , and curve 2 – for configuration, in which the membrane M_l was placed under membrane M_r



Ryc. 2. Zależność współczynnika asymetrii (k) napięciowego efektu stężeniowych warstw granicznych od stosunku stężeń C_{m1}/C_o dla wodnych roztworów NaCl

Fig. 1. Dependence of the asymmetry coefficient (k) of voltage concentration boundary layers effect on quotient C_{m1}/C_o for aqueous NaCl solutions



Ryc. 3. 2-membranowa komórka dyfuzyjna zawierające dwie różne membrany M_l , M_r usytuowane w płaszczyznach horyzontalnych i wykazująca asymetrię efektu napięciowego stężeniowych warstw granicznych. W konfiguracji A przedstawionej na ryc. 3A membrana M_l znajduje się nad membraną M_r , a w konfiguracji B przedstawionej na ryc. 3B, kolejność ustawienia membran jest odwrotna. Symbole l_l^A , l_{lm}^A , l_{rm}^A , l_r^A , l_l^B , l_{lm}^B , l_{rm}^B , l_r^B oznaczają stężeniowe warstwy graniczne odpowiednio w konfiguracji A i B; C_l , C_{ms} , C_r – stężenia roztworów poza stężeniowymi warstwami granicznymi; C_l^A , C_{ml}^A , C_{mr}^A , C_r^A , C_l^B , C_{ml}^B , C_{mr}^B , C_r^B – stężenia roztworów na granicy membrana – stężeniowa warstwa graniczna

Fig. 3. The double-membrane diffusion cell containing two various membranes M_l , M_r oriented in horizontal planes and produced the asymmetry of voltage effect of concentration boundary layers. In configuration A presented on Fig. 3A, the membrane M_l is placed under the membrane M_r . In configuration B, presented in Fig. 3B, sequence of membranes is reverse. Symbols l_l^A , l_{lm}^A , l_{rm}^A , l_r^A , l_l^B , l_{lm}^B , l_{rm}^B , l_r^B signed the concentrations boundary layers in configurations A and B, respectively; C_l , C_{ms} , C_r – the concentrations of solution outside concentration boundary layers; C_l^A , C_{ml}^A , C_{mr}^A , C_r^A , C_l^B , C_{ml}^B , C_{mr}^B , C_r^B – the concentrations of solution on the border membrane-concentration boundary layer